

学校编码: 10384

密级_____

学 号: 22620101151412

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

福建省重点城市大气 PM_{2.5} 的化学组成及来源解析

Chemical Composition and Source Apportionment of PM_{2.5}
in Key Cities of Fujian Province

郑 桢

指导教师姓名: 吴水平 副教授

专 业 名 称: 环 境 科 学

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩时间: 2013 年 6 月

2013 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

目录

摘要.....	VI
ABSTRACT	VIII
第 1 章 绪论.....	1
1.1 立项依据	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究的意义和目的	2
1.2 国内外研究进展	2
1.2.1 大气颗粒物的粒径分布与 PM _{2.5}	2
1.2.2 PM _{2.5} 质量浓度	3
1.2.3 PM _{2.5} 的化学组成.....	4
1.2.4 PM _{2.5} 的来源解析.....	5
1.2.5 PM _{2.5} 对能见度的影响	10
1.2.6 PM _{2.5} 对人体健康的影响	11
1.3 技术路线及各章节内容	12
1.3.1 技术路线	12
1.3.2 本研究各章节内容	13
第 2 章 采样预处理及实验部分.....	14
2.1 采样预处理	14
2.1.1 PM _{2.5} 采样及预处理	14
2.1.2 源样品的采集及预处理	15
2.2 实验部分	17
2.2.1 水溶性离子分析.....	17
2.2.2 无机元素分析	17
2.2.3 碳成分分析	18
第 3 章 PM _{2.5} 质量浓度及化学组成.....	19

3.1 四个采样点 $PM_{2.5}$ 质量浓度的差异	19
3.2 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的污染特征	21
3.2.1 水溶性离子的污染水平	21
3.2.2 不同季节水溶性离子的差异	22
3.2.3 $PM_{2.5}$ 中水溶性阴阳离子当量比	24
3.3 无机元素污染特征	26
3.3.1 无机元素的污染水平和季节变化	27
3.3.2 无机元素的富集因子	28
3.3.3 元素的因子分析及比值特征	30
3.4 碳组分特征	31
3.4.1 有机碳和元素碳的污染水平和季节变化	32
3.4.2 OC、EC 相关性和二次有机碳的估算	34
3.5 $PM_{2.5}$ 与组分间的相关性	36
3.6 本章小结	38
第 4 章 $PM_{2.5}$ 质量重构与来源解析	40
4.1 $PM_{2.5}$ 质量平衡特征	40
4.1.1 $PM_{2.5}$ 质量平衡的区域差异	41
4.1.2 $PM_{2.5}$ 质量平衡的季节差异	42
4.2 因子分析	44
4.3 CMB 模型解析	48
4.3.1 优化后的 CMB 模型解析结果	48
4.3.2 CMB 模型解析结果的区域差异	49
4.3.3 CMB 模型解析结果的季节差异	51
4.3.4 高污染与低污染情况下 CMB 解析结果	52
4.4 正矩阵因子模型 (PMF)	53
4.4.1 PMF 解析结果的区域差异	53
4.4.2 PMF 解析结果的季节差异	54
4.5 CMB、PMF 模型结果比较	58
4.6 本章小结	59

第 5 章 总结与展望.....	60
5.1 总结.....	60
5.2 展望.....	61
参考文献.....	62
附录.....	70
攻读硕士学位期间参加的科研活动和发表的论文	76
致谢.....	77

Contents

Abstract in Chinese	VI
Abstract	VIII
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Motivations	1
1.1.1 Background	1
1.1.2 Aims and implecations	2
1.2 Research progress	2
1.2.1 Size distribution of atmospheric particulate matter and $PM_{2.5}$	2
1.2.2 Mass concentration of $PM_{2.5}$	3
1.2.3 Chemical component of $PM_{2.5}$	4
1.2.4 Source identification of $PM_{2.5}$	5
1.2.5 Impact of $PM_{2.5}$ on visibility	10
1.2.6 Impact of $PM_{2.5}$ on human health	11
1.3 Technical route and content of each chapter	12
1.3.1 Research technical route	12
1.3.2 Content of each chapter	13
Chapter 2 Sampling、 pretreatment and experimental section	14
2.1 Sampling and Pretreatment	14
2.1.1 $PM_{2.5}$ sampling and pretreatment	14
2.1.2 Source sampling and pretreatment	15
2.2 Experimental section	17
2.2.1 Analysis of water-soluble ions	17
2.2.2 Analysis of inorganic elements	17

2.2.3 Analysis of OC and EC	18
Chapter 3 PM _{2.5} mass concentration and chemical component.....	19
3.1 Variation of PM _{2.5} mass concentration	19
3.2 Characteristic of PM _{2.5} -bound water-soluble ions	21
3.2.1 Characteristics of water-soluble ions concentration.....	21
3.2.2 Seasonal variation of water-soluble ions concentration.....	22
3.2.3 Ratio between total anions and cations equivalent of PM _{2.5}	24
3.3 Characteristic of inorganic element	26
3.3.1 Concentrations and seasonal variation of inorganic element.....	27
3.3.2 Enrichment factor of inorganic element.....	28
3.3.3 Factor analysis and ratio characterisitic	30
3.4 Characteristic of PM _{2.5} -bound OC and EC	31
3.4.1 Concentrations and seasonal variation of OC、EC	32
3.4.2 Correlation analysis between OC、EC and estimation of SOC.....	34
3.5 Correlation between PM _{2.5} and components	36
3.6 Chapter summary	38
Champter 4 Characteristic of mass balance and source identification.....	40
4.1 Characteristic of PM _{2.5} mass balance	40
4.1.2 Regional differences of PM _{2.5} mass balance.....	41
4.1.3 Seasonal variation of PM _{2.5} mass balance.....	42
4.2 Factor analysis.....	44
4 3 CMB molel analysis	48
4.3.1 CMB model result after optimization.....	48
4.3.2 Regional differences of CMB model result	49
4.3.3 Seasonal variation of CMB model result	51
4.3.4 Variation of results in high pollution and low pollution situation.....	52

4.4 PMF model analysis	53
4.4.1 Regional differences of PMF model result	53
4.4.2 Factor distribution of PMF model result	54
4.5 Comparision between CMB and PMF.....	58
4.6 Chapter summary	59
Chapter 5 Summary and prospections	60
5.1 Summary.....	60
5.2 Prospections	61
References.....	62
Appendix	70
Scientific research activities and published papers during master degree	76
Acknowledgment.....	77

摘要

大气 $\text{PM}_{2.5}$ 是造成城市大气能见度下降和居民呼吸道慢性病增加的主要因素之一，在化学组成的基础上建立适合本地区的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 源解析模型，是制定科学有效减排措施的关键。本研究在福建省厦门（洪文站）、泉州（环保局）、莆田（秀屿区政府）和福州（紫阳观测站）设置采样站点，于 2011 年 10 月、2011 年 11 月、2012 年 1 月、2012 年 4 月和 2012 年 7 月进行采样，并对样品中的水溶性离子、碳成分和无机元素进行分析，并结合本地区源排放 $\text{PM}_{2.5}$ 的组成特征，采用因子分析（FA）和受体模型（CMB、PMF）等手段对大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染来源进行了解析，主要获得如下结论：

1. 厦门、泉州、莆田和福州四个站点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年均值分别为 $49.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $53.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $48.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $54.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，季节变化规律为春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季。

2. 四个采样点 $\text{PM}_{2.5}$ 二次离子（ NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ ）的浓度分别为 $21.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $22.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $21.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $21.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占 $\text{PM}_{2.5}$ 百分比平均为 47.76%、46.35%、49.53% 和 42.77%，四个站点二次离子 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值分别为 0.45、0.46、0.51 和 0.48，表明福建地区主要是煤烟型污染地区。四个采样点阴阳离子当量比值均高于 1。四个站点总的元素浓度年平均值分别为 $6.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $6.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $5.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $6.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占 $\text{PM}_{2.5}$ 的百分比为 12.21%、12.40%、11.71% 和 11.30%，富集因子显示 K、Ca、Na、Mg、Al、Fe、Ti 等元素主要是地壳来源。四个站点年均 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC 的质量浓度分别为 $8.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $9.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $7.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $10.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，EC 的年平均质量浓度分别为 $1.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $1.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $0.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $1.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，OC、EC 质量浓度的相关系数 R^2 在 0.37~0.45 之间，表明全年 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC、EC 质量浓度的存在一定相关，从不同季节 OC、EC 的相关性来看，表现出冬季和夏季相关性低于秋季和春季。

3. 质量平衡结果表明，四个采样点七个主要成分（土壤尘、微量元素、EC、OM、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ ）所占总的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量百分比为 84.74%、85.67%、79.32%、83.28%。其中含量最高的成分均为有机物，贡献分别为 28.28%、29.34%、24.31% 和 31.51%，二次离子占比分别为 43.57%、42.67%、44.76% 和 39.67%，四个站点不同季节解析百分比分别为秋季（89.42%~114.79%），冬季（94.28%~107.62%），

春季（67.32%~76.11%），夏季（63.27%~80.24%）。因子分析结果显示主要包含二次颗粒物、汽车尾气、生物质燃烧、重油排放、土壤及建筑尘、燃煤及海盐六大因子。

4. CMB 模型解析结果显示，四个站点中二次颗粒为首要的污染物，贡献分别为 42.69%、42.39%、40.06%和 32.77%，汽车尾气贡献分别为 13.28%、10.03%、13.09%和 22.76%，木材燃烧贡献分别为 15.25%、17.64%、18.69%和 17.03%，土壤尘贡献分别为 10.69%、12.75%、4.40%和 2.25%，CMB 模型解析结果也存在明显的季节差异，总的解析百分比来看秋季（103.42%~112.05%），冬季（97.27%~109.17%），春季（71.56%~78.02%），夏季（80.40%~91.30%）。木材燃烧源表现出明显的秋冬季高于春夏季，重油燃烧表现出明显的夏季高于其他季节，汽车尾气尘表现出秋季和夏季高于冬季和春季，二次硫酸盐和二次硝酸盐在冬季最高，夏季最低。

5. PMF 模型解析结果显示，解析出来的六个因子分别为二次颗粒、生物质燃烧、土壤及建筑尘、重油燃烧、汽车尾气以及燃煤尘。二次颗粒是主要的污染物，贡献分别为 55.96%、38.07%、40.67%和 32.88%。汽车尾气贡献分别为 18.04%、6.16%、2.86%和 12.50%，木材燃烧贡献分别为 6.55%、19.05%、20.68%和 20.42%，土壤尘贡献分别为 10.74%、12.32%、16.98%和 14.30%，季节变化显示，从泉州采样点来看，二次颗粒的分配比例在冬季和春季高于秋季和夏季，土壤尘在 4 月份初期贡献明显高于其他时间，说明该时段土壤扬尘贡献较高，重油燃烧在夏季 7 月份显著高于其他月份，燃煤尘在秋季显著高于其他季节。

关键词：PM_{2.5}；化学组成；源解析；CMB；PMF

Abstract

PM_{2.5} can influence atmospheric visibility and residents respiratory diseases to a great extent, and its source apportionment based on the chemical compositions is very important for local government to take scientific measures to reduce its atmospheric level. Four sampling sites including Xiamen Hongwen Primary School (XM), Environmental Protection Bureau of Quanzhou (QZ), Xiuyu District Government, Putian city (PT) and Ziyang automatic air monitoring station in Fuzhou (FZ) were selected to collect PM_{2.5} in October, 2011, November 2011, January 2012, April 2012 and July 2012. The samples were analyzed for water-soluble ions, organic carbon (OC), elemental carbon (EC) and inorganic elements. Factor analysis (FA) in combination with two receptor models (CMB and PMF) were used to quantify the possible emission sources of PM_{2.5}. The main results are as follows:

1. The annual PM_{2.5} concentrations were 49.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 53.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 48.77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and 54.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at XM, QZ, PT and FZ sampling sites, respectively. The highest levels of PM_{2.5} were found in spring followed by winter, fall and summer.

2. The annual sum of secondary ions (NO_3^- , SO_4^{2-} and NH_4^+) was 21.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 22.70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 21.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 21.64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ accounting for 47.76%, 46.35%, 49.53% and 42.77% of PM_{2.5} at XM, QZ, PT and FZ, respectively. And the ratio of NO_3^- to SO_4^{2-} ranged from 0.45 to 0.51 indicating that coal combustion contributed more sulfate than nitrate in respect to vehicle exhausts. The ratio of anion ions to cation ions in the unit of micro-equivalents per cubic meter (meq/m^3) was higher than one suggesting that there were insufficient cations present to balance anions. As for inorganic elements, their total concentration ranged from 5.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 6.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ accounting for around 12% of PM_{2.5}. Enrichment factor analysis indicated that Fe, Al, Mg, K, Ca, Ti and Si mainly came from the soil dusts. Concentration of OC/EC was 8.89/1.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 9.75/1.39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 7.43/0.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 10.74/1.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at XM, QZ, PT and FZ sites, respectively. Seasonal variations of OC and EC were characterized as higher in winter/spring and lower in fall/summer. The correlation analysis between OC and EC with R^2 in the range of 0.37-0.45 suggested that they might come from similar emission sources. However, the correlation coefficients in fall/spring were greater than those in winter/summer.

3. Mass balance results showed that seven major components (soil dust, trace elements, EC, OM, NO_3^- , SO_4^{2-} and NH_4^+) accounted for 84.74%, 85.67%, 79.32%,

and 85.67% at XM, QZ, PT and FZ sites, respectively. The highest content in $PM_{2.5}$ was organic matter (from 24.31% to 31.51%). The sum of three secondary ions (NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+) accounted for 43.57%, 42.67%, 44.76% and 42.67% at XM, QZ, PT and FZ site, respectively. Based on the factor analysis results, a total of six principal components including secondary particles, vehicle exhausts, biomass burning, crude oil combustion, soil/construction site fugitive dusts, coal combustion dusts and sea salt were identified.

4. The CMB model results showed that the three major sources were secondary particles (from 32.77% to 42.69%), vehicle exhaust (from 10.03% to 22.76%) and biomass burning (from 15.25% to 18.69%). The highest contribution of heavy oil combustion was found in summer suggesting a possible contribution of chimney exhausts from boats and ships, while the highest contribution of secondary sulfate and nitrate was found in winter. The contribution of biomass burning was found higher in fall/winter and lower in spring/summer.

5. A total of six emission sources were identified using PMF model. The highest contribution was secondary particles (from 32.88% to 55.96%) followed by biomass burning (from 6.55% to 20.68%), soil/construction site fugitive dusts (10.74% to 16.98%) and vehicle exhausts (from 2.86% to 18.04%). Take QZ site for example, both secondary particles and soil dusts contributed more in April than those in other periods. Heavy oil combustion was also found higher in summer than in other seasons similar to the result using CMB. However, highest contribution of coal combustion was found in fall.

Key words: $PM_{2.5}$; Chemical composition; CMB; PMF

第1章 绪论

1.1 立项依据

1.1.1 研究背景

PM_{2.5}也称细颗粒物,是指空气动力学直径 $2.5 \leq \mu\text{m}$ 的大气颗粒物,与粗颗粒物(空气动力学直径 $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$)相比,PM_{2.5}对人体健康的危害更大,主要原因在于(1)燃烧排放的重金属及多环芳烃等有毒有害物质大多吸附在小于 $1 \mu\text{m}$ 的细颗粒物上,该尺寸的颗粒物90%可以深入到肺泡区(唐孝炎等,2006);(2)PM_{2.5}的比表面积更大,与人体组织接触的面积也相应增大,从而毒性也更大;

(3)PM_{2.5}在大气中停留的时间较长(7~30天),在特定气象条件下可以通过长距离输送,污染距离较远的地方,从而对区域乃至全球环境产生影响。因此进入90年代后,气溶胶的研究方向主要转移到细颗粒物方面(刘彦等,2004; Chu and paisie et al., 2006; Rinehart et al., 2005; Bari et al., 2003; Long et al., 2003; Rattigan et al., 2006; Sawant et al., 2004; Lewandowski et al., 2007; Bae et al., 2006; Na et al., 2004; Qureshi et al., 2006; Gao et al., 2002; Arx et al., 2004; Sillanpa et al., 2005)。

大气颗粒物不是单一成分的空气污染物,通常由多种排放源(包括人为来源和自然来源)共同排放的包含多种化学成分的组成的复合型大气污染物。一般情况下将污染源直接排放的污染物称为一次污染物,例如路面扬尘、建筑尘和生物质燃烧等,将污染源排放的部分气态污染物如(SO_2 、 NO 、 NO_x)经过冷凝以及光化学反应生成二次污染物(如 SO_4^{2-} 、 NO_3^-)。研究大气颗粒物的化学组成对于了解颗粒物对污染来源、能见度、气候和人体健康的影响具有重要意义。目前欧美以及国内的研究人员普遍将PM_{2.5}的研究重点放在PM_{2.5}的化学组成、能见度、气候、人体健康以及来源解析等方面。

本文研究的四个采样点基本覆盖了福建省内由南到北的沿海区域,基本能概况沿海地区的地形地势和气候特征,也包含了福建省几大重点城市福州、泉州和厦门。福州市是福建省省会城市和福建省政治和文化中心;泉州是福建民营经济的发源地,有众多知名服装、鞋类品牌、纺织业以及食品行业较为发达,泉州下面的晋江有中国鞋都的美誉,同时泉州还是福建省人口最多的地级市;厦门是

国家最早确立的经济特区之一，以旅游业带动的第三产业发达，是国内知名的旅游城市。由于三地都属于沿海城市，有自己特有的港口优势，海运能力较强，因此了解这些地区大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 的来源对了解福建省大气颗粒物来源具有重要意义，本文将从化学组成及来源解析方面重点阐述福建省重点城市的 $PM_{2.5}$ 的化学组成以及来源解析。

1.1.2 研究的意义和目的

本次研究主要选取福建省内几个重点城市，其中包括省会城市福州，福建省民营企业最集中的泉州，经济特区厦门以及沿海城市莆田。福州火电厂、莆田秀屿湄洲湾火电厂和厦门集美嵩屿火电厂都是福建省装机容量较大的火力发电厂，三地都有较大港口，同时厦门、泉州和福州是福建省机动车保有量最高的三个城市，这些都是排放大气细颗粒物的主要来源。因此，对本地区大气 $PM_{2.5}$ 的来源进行定量解析，是制定科学有效控制措施的关键。

本研究通过4个城市站点大气 $PM_{2.5}$ 不同季节的采样观测，结合源解析模型，对大气 $PM_{2.5}$ 的主要来源进行定量分析，以期为进一步的空气质量模型和污染治理提供基础数据。

1.2 国内外研究进展

目前国内外已经做了许多关于 $PM_{2.5}$ 的研究工作，主要集中在 $PM_{2.5}$ 的质量浓度、化学组成、来源解析、能见度的影响、气候的变化以及对人体健康的影响。下面将主要就这几方面的研究工作进行综述。

1.2.1 大气颗粒物的粒径分布与 $PM_{2.5}$

大气颗粒物的来源以及形成过程，在大气中的迁移转化、传输和消除过程以及物理化学性质与颗粒物的粒径有着最直接的关系。如图1.1所示（刘强等，1999），大气颗粒物通常呈三模态分布，即粒径小于 $0.08\ \mu m$ 的爱根核模态（Aitken mode）、粒径 $0.08\sim 2\ \mu m$ 的积聚模态（Accumulation mode）和粒径大于 $2\ \mu m$ 的粗粒子模态（Coarse particle mode）。

一般将爱根核模态和积聚模态的颗粒物称为细颗粒物（也称为细粒子），大气颗粒物中大部分硫酸、硫酸氢铵、硫酸铵、硝酸铵、元素碳（EC）和有机碳

(OC) 等存在于这一粒径范围之内。不过, 不同的文献对细粒子和粗粒子的粒径分界的各种规定稍有差别, 一般认为分界线在 $2.0\sim 3.5\ \mu\text{m}$ 之间 (唐孝炎等, 2006)。US EPA 提出的颗粒物主要是基于粗、细粒子的界限, 而不是基于颗粒物进入呼吸系统某些部位的能力。不过, ISO 提出的易引起儿童和成人发生肺部疾病的“高危险性”颗粒物为小于 $2.4\ \mu\text{m}$ 的颗粒物, 与 $\text{PM}_{2.5}$ 很接近。与粗颗粒物相比, 细颗粒物比表面要大得多, 更易成为其它污染物的运载体和反应体, 许多有毒、有害化学成分在细颗粒物中的富集度更高。

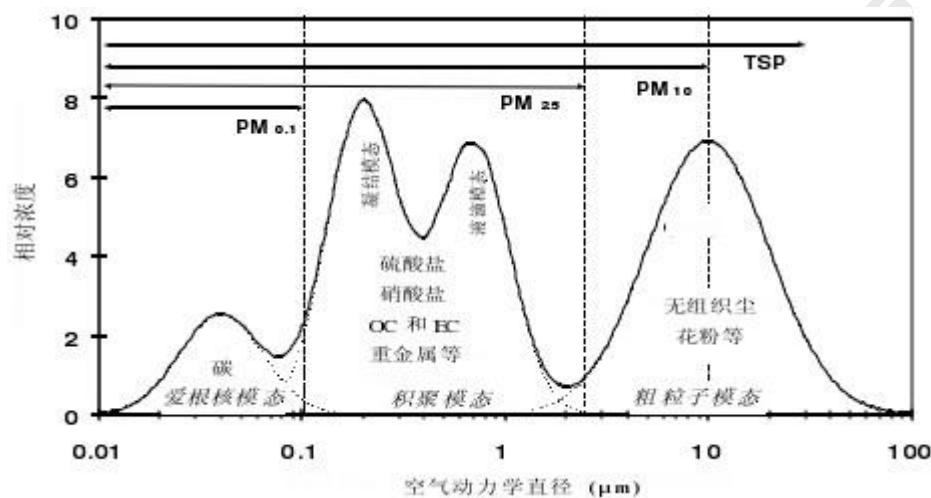


图 1.1 大气颗粒物的三模态分布

Fig 1.1 Three mode distribution of atmospheric particles

1.2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度

大气细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与一个地区的污染源排放, 地形气候条件有一定影响, 世界各国都广泛开展了 $\text{PM}_{2.5}$ 的监测工作, 其中美国对 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究工作进行的最为深入, 其次是欧洲。世界各地学者对细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组成进行了广泛的研究, 其中美国对 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究开展得最早, 也最深入。2000年2月至2001年1月, 加利福尼亚地区 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 空气质量研究项目 (CRPAQS) 在该地区设立的20个观测站的观测数据表明该地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均质量浓度为 $13.5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Chu et al., 2006)。在2000年10月至2001年1月, 即晚秋至初冬期间维持在较高水平, 在此期间, 加利福尼亚中部大部分地区日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超标, 最高浓度为 $175\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。美国EPA1999年10月在犹它州盐湖城开展了公众影响的环境监测计划

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”. Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库